2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열수력 계통분석코드MARS의 다차원 해석을 위한 Porous Media 해석방법 적용

Application of Porous Media approach for Multi-Dimensional analysis of Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS

이석민, 이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림9동 산56-1

배성원, 정법동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

다차원 유동장 해석을 위해 한국원자력연구소에서 개발된 MARS의 MULTID component에 porous media 해석방법을 적용하였다. 이 해석방법은 단일 유체나 내부 구조물을 포함한 유동을 해석하는데 널리 사용되고 있는 방법으로, 내부 구조물등으로 인해 유로 면적 및 체적이 변화하는 경우의 유동장 계산시 유용하게 적용될 수 있는 방법이다. 이를 MARS에서 새롭게 개발된 MULTID component에 적용하였으며, 그 해석의 타당성을 검토하기 위해 CFD해석 코드인 FLUENT코드를 이용하여 비교해 보았다. 그 결과 porous media 해석 방법이 적용된 MARS 계산결과가 FLUENT 계산결과와 근사한 경향을 보여, 그 적용범위를 확대할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

The Porous media approach method was applied to the MULTID component of MARS which was developed by KAERI. This method has been widely used for analysis of large regions containing only fluid and for flows in regions with immersed solids. It can calculate flow distribution more correctly in case of flow area or volume change. Application of this method to the MULTID component in MARS was evaluated and the results were compared with those of CFD code, FLUENT. As a result, the calculated flow distributions of MARS and FLUENT show similar trend, so the effect of porous media in MARS can be applied to the other cases.

1. 서 론

한국원자력연구소에서 개발된 MARS 코드는 다차원 열수력 해석코드로서 1D 및 3D계산이 가능하도록 설계되어 있다. 그러나 3D해석은 COBRA-TF 모듈을 적용한 것으로 원통형 좌표계가 필요한 큰 탱크에서의 다차원적인 유동이나 노심채널 간의 난류혼합이 아닌 난류유동모델 적용에는 3차원 유동장의 정확한 해석결과를 얻을 수 없다. 이에 MARS 1D 모듈에 운동량 방정식의 대류 및 난류항에 3차원 해석을 고려한 MULTID component를 고려하여 3차원 유동장 해석을 가능하도록 시도하였다. 본 연구에서는 3차원 해석이 가능하도록 한 MULTID component의 운동량 방정식에 porous media 해석 방식을 추가하여 계산 셀 내에 존재하는 구조물에 따른 속도장의 영향을 고려하도록 하였다.

Porous media 접근방식은 식(1),(2)에서 정의한 것과 같이 체적다공성(volume porosity), 표면투과성(surface permeability)을 가지고 집합체 열수력 해석을 위해 제안되었다. 그림1은 제한 체적을 나타낸 것으로, 체적다공성(γ_V)은 계산셀의 전체체적(V)에서 유체가 차지하는 체적 비를 나타내며, 표면투과성(γ_V)은 전체표면 면적(A)에 대한 이용가능한 표면적의 비를 나타낸다. 이러한 porous media 해석방식은 부수로 해석방법과 달리 반경방향 운동량 방정식이 불필요하고 이에 따른 제한체적의 가정이 줄어들어 그 적용범위를 확대할 수 있다. 1차원 해석 코드인 MARS-1D에 다차원 해석을 위해 삽입된 MULTID component에 이러한 porous media 해석방식을 적용하였다.

체적다공성 : $$\gamma_v = \frac{V_k}{V} \quad (1)$$

표면투과성 : $$\gamma_a = \frac{A_k}{A} \quad (2)$$

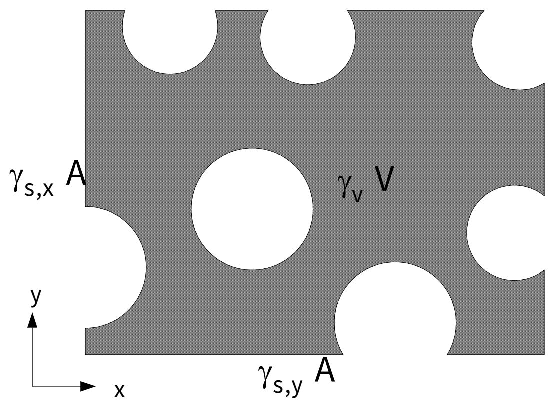

그림1. Porous media 해석에 사용되는 제한체적

2. Porous media 해석을 고려한 운동량 방정식

Porous medium 해석방식을 사용하는 대표적인 코드는 COMMIX코드가 있으며 이 코드에서 사용하는 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_v \rho_v \frac{\partial}{\partial t}(U_v) + \lambda_v U_v \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{D}{\gamma_v} \right) + \nabla(\gamma_s \rho_v U_v U_v) = -\gamma_v \nabla P + \Delta(\gamma_s \tau_{vv}) + \gamma_v \alpha \rho_v g - \gamma_v R_v \qquad (3)$$

또한 1990년대 후반 일본에서 개발된 3차원 해석코드인 TWINFLOW코드에서도 porous media 접근방식을 사용하고 있는데, 이 코드에서 사용되는 운동량 방정식을 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\gamma_v \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v U_v) + \nabla(\gamma_s \alpha \rho_v U_v U_v) + \gamma_v \alpha \nabla P \\ &= \Delta\{\gamma_s \alpha (\mu_v + \mu_{tv}) U_v\} + \frac{1}{3} \nabla \{\gamma_s \alpha \mu_v \nabla(\gamma_s U_v)\} - \gamma_v F_{wv} - \gamma_v F_i + \gamma_v \alpha \rho_v g \end{aligned} \qquad (4)$$

위의 두가지 코드에서 적용한 방법을 고려하여 MARS-1D의 MULTID component의 운동량 방정식에도 적용하였다. MARS-1D 모듈의 경우 질량, 에너지 방정식은 이미 방정식 유도과정에서 주 유동방향에 대해 전체 체적 및 표면적에 대한 유체가 차지하는 비율이 적분과정에서 고려되어 있으며, 운동량 방정식 또한 체적 및 면적변화가 고려되어 계산되고 있다. 그러나 새롭게 추가된 MULTID component는 단순화된 기하학적 구조에서 3차원으로 유동장을 계산하고 있으나 구조내부에 존재하는 구조물에 대한 고려가 충분히 고려되어 있지 못하였다. 따라서 유동내에 존재하는 구조물등으로 인한 유동 체적 및 면적 변화를 고려해 주는 인자가 필요하다. 이를 위해 유동내 구조물에 의한 체적 및 면적의 변화를 나타내는 체적다공성과 표면투과성 인자를 고려하는 porous media 해석 방식을 도입하여 MARS 코드를 개선하였다.

MARS-1D에서 사용하는 일반적인 운동량 방정식을 단순화된 형태로 살펴보면 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \bullet \nabla \vec{V} \right) = -\nabla P + \overline{\sigma} + \rho \vec{f} \qquad (5)$$

윗 식(5)에 porous media 해석 방법을 적용할 경우, 각 계산셀이 갖는 체적 및 면적의 변화비를 고려한 다음과 같은 운동량 방정식을 구성할 수 있다.

Vapor phase

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t}\alpha_g \rho_g \underline{v}_g + \nabla\left(\gamma_s \alpha_g \rho_g \underline{v}_g \underline{v}_g\right) + \gamma_v \nabla \cdot \alpha_g P = \gamma_v \alpha_g \rho_g \underline{g} + \nabla\left(\gamma_s \underline{\underline{\tau}}\right) - \gamma_v F_{ig} - \gamma_v F_{wg} \quad (6)$$

Liquid Phase

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t}\alpha_f \rho_f \underline{v}_f + \nabla\left(\gamma_s \alpha_f \rho_f \underline{v}_f \underline{v}_f\right) + \gamma_v \nabla \cdot \alpha_f P = \gamma_v \alpha_f \rho_f \underline{g} + \nabla\left(\gamma_s \underline{\underline{\tau}}\right) - \gamma_v F_{if} - \gamma_v F_{wf} \quad (7)$$

식(6)은 vapor phase에 대한 운동량 방정식이며 식(7)은 liquid phase의 방정식이다. 식(6)과 식(7)의 각 항을 체적다공성(γ_V) 인자로 나누어 주면, 각 식 좌변의 두번째 항인 대류과 우변의 확산항에만 체적다공성과 표면투과성이 고려된다. 본 식을 직각 좌표계와 원통형 좌표계에서 유한 차분식으로 나타내기 위하여 대류항과 전단응력 항을 각각 explicit하게 처리하였다. 우선 대류항 만을 고려할 경우, 그림2의 노드를 기준으로 식(6)의 대류항의 x방향에 대한 차분방정식을 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

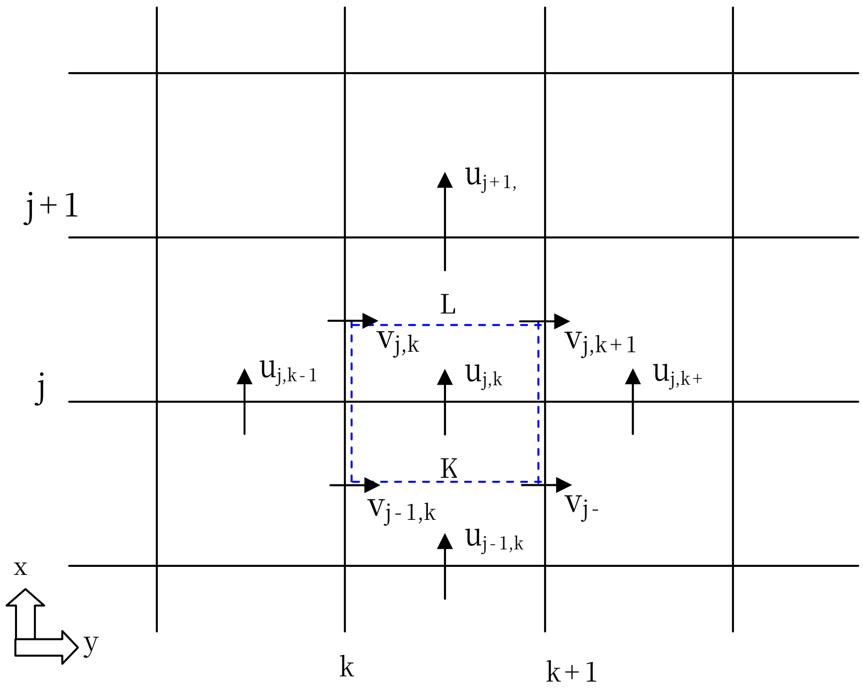

그림2. 운동량 방정식을 차분화 하기 위한 제한체적

$$
\begin{aligned}
&\frac{1}{\gamma_v}\nabla\left(\gamma_s \alpha_g \rho_g \underline{v}_g \underline{v}_g\right) \\
&= \frac{1}{\gamma_v V}\left\{\left[\gamma_s \alpha_g \rho_g \underline{v}_g (\underline{v}_g \cdot \underline{n}) A_s\right]_{A_L} - \left[\gamma_s \alpha_g \rho_g \underline{v}_g (\underline{v}_g \cdot \underline{n}) A_s\right]_{A_K}\right\} \\
&= \left(\frac{1}{\gamma_v \Delta x}\right)_{j,k,l} \frac{1}{2}\left(\alpha_g^* \rho_g^*\right)_{j.k.l}^n \left[\left(\gamma_s u_g^2\right)_L^n - \left(\gamma_s u_g^2\right)_K^n\right] \\
&+ \left(\frac{1}{\gamma_v \Delta y}\right)_{j,k,l} \frac{1}{2}\left[\left(\alpha_g^* \rho_g^*\right)_{j.k+1.l}^n \left(u_g^*\right)_{j,k+1,l}^n \left(\gamma_s v_{g,j,k+1,l}^n + \gamma_s v_{g,j-1,k+1,l}^n\right) - \left(\alpha_g^* \rho_g^*\right)_{j.k.l}^n \left(u_g^*\right)_{j,k,l}^n \left(\gamma_s v_{g,j,k,l}^n + \gamma_s v_{g,j-1,k,l}^n\right)\right] \\
&+ \left(\frac{1}{\gamma_v \Delta z}\right)_{j,k,l} \frac{1}{2}\left[\left(\alpha_g^* \rho_g^*\right)_{j.k.l+1}^n \left(u_g^*\right)_{j,k,l+1}^n \left(\gamma_s w_{g,j,k,l+1}^n + \gamma_s w_{g,j-1,k,l+1}^n\right) - \left(\alpha_g^* \rho_g^*\right)_{j.k.l}^n \left(u_g^*\right)_{j,k,l}^n \left(\gamma_s w_{g,j,k,l}^n + \gamma_s w_{g,j-1,k,l}^n\right)\right]
\end{aligned}
\tag{8}
$$

MULTID component 난류항에 대한 porous media 해석방법의 적용은 아직 진행중이므로, 우선 대류항만을 고려한 식(8)의 결과를 MULTID component 계산에 삽입하여 그 계산의 결과가 타당성을 갖고 있는지 검증해 보았다.

3. 검증계산 및 계산 결과

MULTID component는 직각좌표계 및 원통좌표계 모두에 사용할 수 있도록 구성되어 있기 때문에 직각좌표계 및 원통좌표계 두가지 모두에 대해 개념문제를 설정하여 유동의 흐름 및 유동장의 변화가 porous region이 있을 경우 어떻게 나타나는지에 대해 살펴보았으며, 이에대해 비교를 하기 위해 CFD 코드인 FLUENT를 사용하여 같은 경우를 고려하여 비교해 보았다. 그러나 FLUENT 코드내에서 고려되는 porous media 해석방법은 운동량 방정식의 source항에 viscous loss와 inertial loss를 고려한 손실항을 삽입하는 형태로 계산한다. 따라서 porous region의 porosity에 따른 속도변화를 계산하도록 고려된 MARS의 porous media 해석방법과는 약간의 차이가 있어, 전체 유동의 거동비교만 가능할 뿐 정확한 수치의 비교는 곤란한 단점을 갖고 있다.

<u>Conceptual problem 1</u>

그림3과 같이 직각좌표계로 구성된 가로6m, 높이9m의 블록 중심부에 가로,세로 2m크기의 porous region을 설정하였다. 체적 및 표면적의 porosity를 50%로 하였으며, 단상의 물이 밑부분에서 균일한 속도(10m/s)로 주입되어 윗부분으로 빠져나가도록 구성하였다.

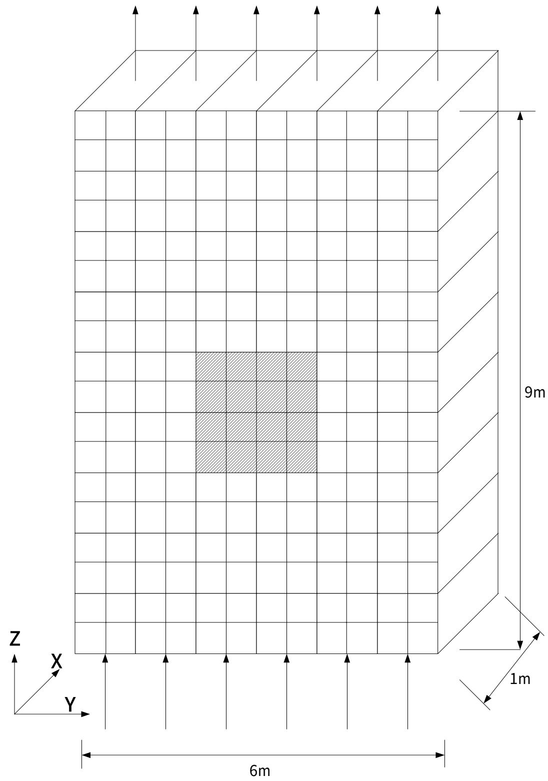

그림3. 직각좌표계에서의 Conceptual problem

그림4와 그림5는 구성된 문제의 MARS계산결과이다. 그림4는 z-평면에 대한 속도장을, 그림5는 속도 벡터를 나타낸 것으로 porous region에서 유체의 속도가 줄어들며 그 영향으로 porous region 외부에서 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, porous region의 영향으로인해 출구에서의 속도또한 감소하는 경향을 보이고 있다.

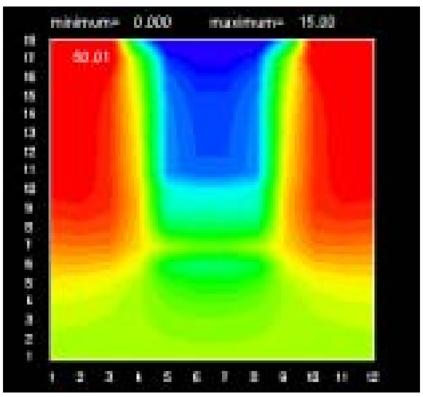

그림4 직각좌표계에 대한 MARS계산결과

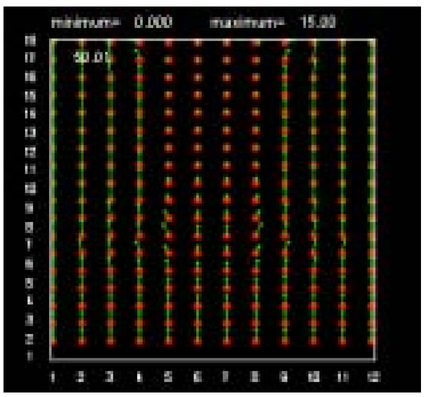

그림5 직각좌표계에 대한 MARS계산결과

그림6은 같은 기하학적 구조에서 FLUENT 계산결과를 나타낸 것이다. FLUENT계산시 k-ε난류모델을 사용하였으며, porous region의 압력차에 의한 손실계수를 입력으로 주었다. 계산셀은 MARS보다 좀더 미세하게 나누어 계산하였다. FLUENT의 경우 porous region의 압력차를 고려하여 porosity에 대한 유속의 변화를 계산하기 때문에 MARS의 계산결과와 약간의 차이를 보이지만, 전체적인 거동은 유사한 것으로 보여진다.

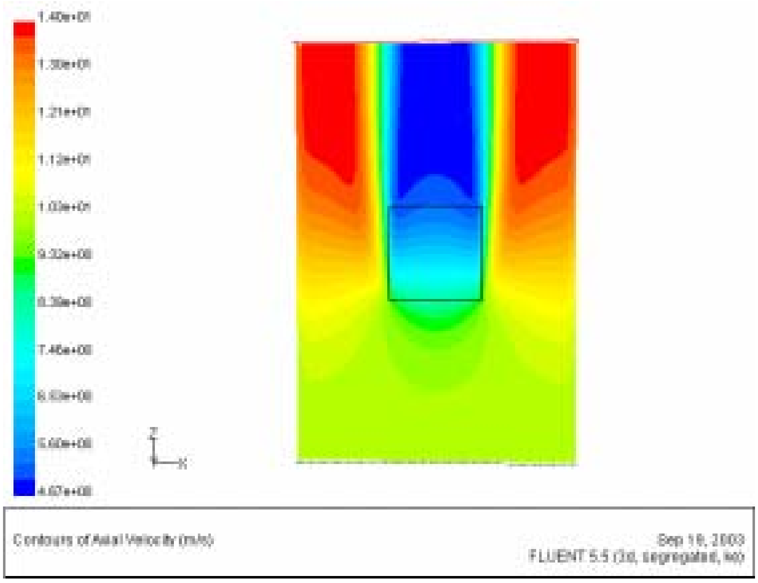

그림.6 직각좌표계에 대한 FLUENT 계산결과

Conceptual problem 2

두번째 계산은 원통형 좌표계에서 높이 1m, 지름1.2m의 원통 중심부에 높이 0.5m, 지름0.6m의 porous region을 구성하였다. 앞선 직각좌표계의 경우와 마찬가지로 원통 밑부분에 동일한 속도(1m/s)로 대기압인 단상의 물을 주입하였고, 상부로 빠져나가도록 구성하여 주입된 물의 porous region에 의한 유동 변화를 살펴보았다. 그림7에 계산에 사용된 기하학적 구조를 상세히 나타내었다.

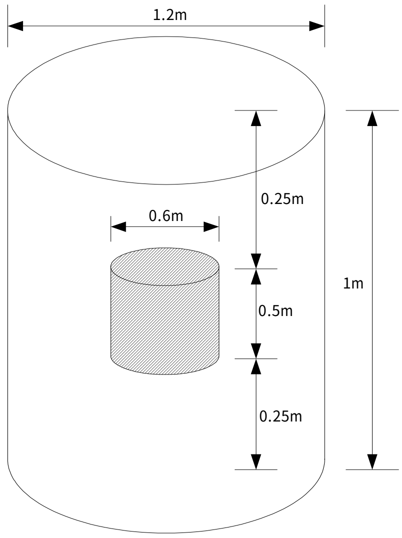

그림7 원통좌표계에서의 Conceptual problem

그림8과 그림9에 MARS로 계산된 결과를 나타내었다. 앞서 직각좌표계의 계산과 마찬가지로 porous region에서의 속도 감소와 주변부의 속도 증가를 확인할 수 있고, porous region의 영향이 출구 부위까지 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 원통형 좌표계의 경우에 대한 FLUENT계산결과를 나타낸 것으로 MARS의 계산과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나 FLUENT의 계산은 체적 및 면적 변화에 대한 압력차이에 따른 속도차를 계산하며, 난류모델에 대한 계산이 추가되어 있어, 원통내부에서 발생하는 swirl flow의 영향으로 인해 MARS의 계산과는 약간 다른 경향을 보이고 있다.

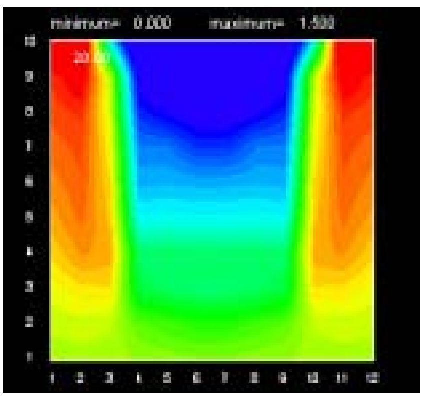

그림 8 원통좌표계에 대한 MARS계산결과

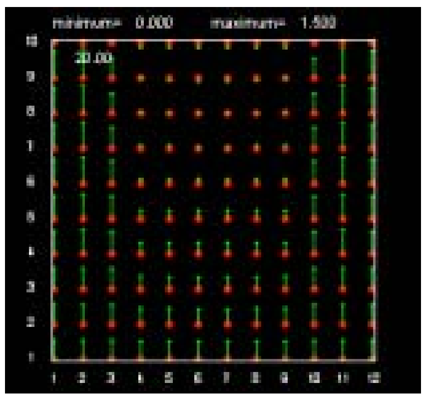

그림9 원통좌표계에 대한 MARS계산결과

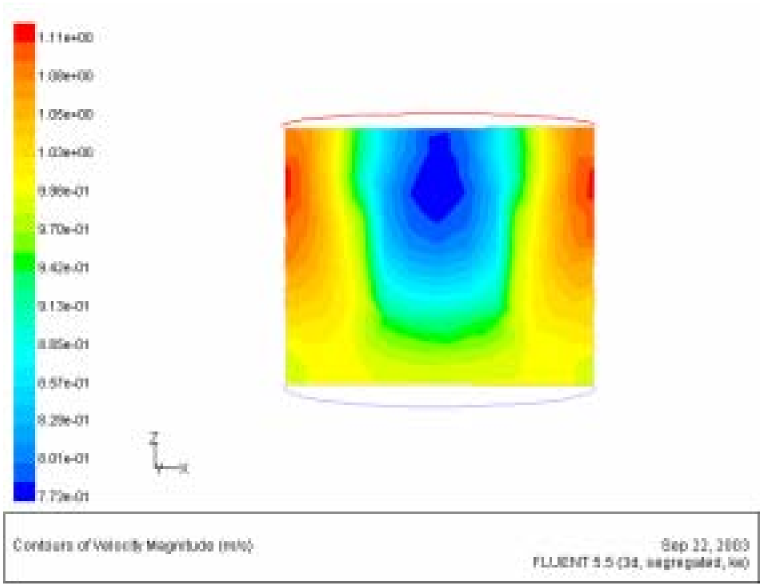

그림10 원통좌표계에 대한 FLUENT 계산결과

4. 결 론 및 향후 연구 방향

MARS-1D 모듈에 운동량 방정식의 대류 및 난류항에 3차원 해석을 고려한 MULTID component에 porous media 해석방법을 적용하여 직각좌표계와 원통형좌표계의 두가지 경우에 대해 중심부에 porous region이 존재하는 기본적인 문제를 설정하여 MARS와 FLUENT의 계산결과를 비교하였다. 앞서 설명한 것 처럼, MARS와 FLUENT가 porous region을 정의하는 방식의 차이로 인해, 직접적인 데이터의 비교는 불가능한것으로 판단되었으나 전체적인 경향의 비교를 통해 MARS에 추가된 porous media 방법의 타당성을 분석하였다. 그 결과 유속 및 유동장의 경향이 CDF해석 코드인 FLUENT와 MARS의 결과가 동일한 경향을 보여주어 MARS의 MULTID component에 고려된 porous media 접근방법 적용이 어느정도 타당한 계산을 한다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 MARS에 새롭게 추가된 MULTID component에서 운동량 방정식의 대류항에 고려된 porous media 해석방법의 타당성을 계산하기 위해 수행된 것으로, 아직까지 확산항에 대해서는 고려되지 못하였다. 추후 확산항에 대한 검증계산을 수행하여 porous media 적용의 타당성이 입증되어야 할 것이며, 그 후 적용범위를 확장한 계산이 수행되어야 할 것으로 본다.

5. 참고문헌

[1] RELAP5-3D Development Team, “RELAP5-3D Code Manuals, Volumes I, II, IV, and V,” Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL- EXT-98-00834, Revision 1.1b. (1999)

[2] 이원재 외 “원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/ 최적열수력계통분석코드 개발”, KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소 (2002)

[3] 정법동 외, “MARS2.2 Code manual, Input requirements”, KAERI/TR-2529/2003, 한국원자력연구소 (2003)

[4] A. Hotta, et.al., “ Three dimensional evaluation of two-phase flow in BWR fuel bundles based on compressible two fluid-one pressure and k-e turbulence models”, Ann. Nucl. Energy, vol.**25**, No.7, pp437-463 (1998)

[5] H.M.Domanus, et.al., ”Application of the COMMIX code using the porous medium formulation,” Nucl. Engineering and Design, V62, pp81-100 (1980).

[6] N.E. Todreas, M.S. Kazimi, Nuclear Systems II, Hemisphere publishing Co., (1989)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.